UNIVERSITÉ DE BORDEAUX

FACULTÉ DE MÉDECINE ET DE PHARMACIE

Année 1957. - N° 82 bis

ÉTUDE DU COMPORTEMENT DES CELLULES PHOTO-VOLTAÏQUES SOUS L'ACTION DES RAYONS X

TRAVAIL DU LABORATOIRE DE PHYSIQUE MÉDICALE
DE LA FACULTÉ DE MÉDECINE DE BORDEAUX
Directeur : Prof. C. PIFFAULT

THÈSE POUR LE DOCTORAT EN MÉDECINE

présentée et soutenue publiquement le jeudi 11 juillet 1957

par

Marc-Henri-Louis ESCUDIÉ
Né à CAUDÉRAN (Gironde), le 12 mai 1930.

Examinateurs de la Thèse

PIFFAULT, professeur	*Président.*
REBOUL, professeur	*Juges.*
BLANQUET, professeur	
DUHAMEL, professeur agrégé	

BORDEAUX
IMPRIMERIES DELMAS
6, place Saint-Christoly

1957

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41543917_0014

UNIVERSITÉ DE BORDEAUX

FACULTÉ DE MÉDECINE ET DE PHARMACIE

Année 1957. - N° 82 bis

ÉTUDE DU COMPORTEMENT DES CELLULES PHOTO-VOLTAÏQUES SOUS L'ACTION DES RAYONS X

THÈSE POUR LE DOCTORAT EN MÉDECINE

présentée et soutenue publiquement le jeudi 11 juillet 1957

par

Marc-Henri-Louis ESCUDIÉ

Né à CAUDÉRAN (Gironde), le 12 mai 1930.

R. UNIV. BIBLIOTHEEK LEIDEN

Examinateurs de la Thèse

PIFFAULT, professeur	*Président.*
REBOUL, professeur	*Juges.*
BLANQUET, professeur	
DUHAMEL, professeur agrégé	

BORDEAUX
IMPRIMERIES DELMAS
6, place Saint-Christoly

1957

FACULTÉ DE MÉDECINE ET DE PHARMACIE DE BORDEAUX

DOYENS HONORAIRES : MM. DUPÉRIÉ, CHELLE, G. PORTMANN
DOYEN : M. SIGALAS. — **ASSESSEUR** : M. TAYEAU.

PROFESSEURS HONORAIRES :

MM. A. MANDOUL, ANDERODIAS, ROCHER, LANDE, DUVERGEY, CARLES, LEURET, CHARRIER, DUBREUIL, CRUCHET, PERRENS, BEAUVIEUX, CREYX, MAURIAC, BONNIN, GOLSE.

PROFESSEURS TITULAIRES :

	MM.
Clinique médicale	DE GRAILLY, BROUSTET
Clinique chirurgicale	PAPIN, MASSE
Clinique d'accouchements	M. RIVIERE
Clinique gynécologique	MAGENDIE
Anat. pathol. et microsc. clin.	LEGER
Anatomie	DUFOUR
Anatomie générale et histologie.	MAYER
Hygiène et clin. de la tubercul.	PIECHAUD
Méd. légale et méd. du travail	DERVILLEE
Electroradiol. et clin. d'électric. médic.	REBOUL
Chimie	MESNARD
Matière médicale	MASQUELIER.
Pharmacie	VITTE
Physiologie	FABRE
Clin. méd. des mal. des enfants.	FONTAN
Zoologie et parasitologie	SIGALAS
Clinique ophtalmologique	SARIC
Pathologie générale et expérim.	BESSIERE

	MM.
Clin. chirurg. inf. et orthop.	POUYANNE
Clin. méd. et des mal. infect.	AUBERTIN
Chimie biologique et médicale	TAYEAU
Physique méd. et pharm.	PIFFAULT
Méd. et hyg. tropicales. et Clin. des mal. exot.	MORETTI
Clin. des mal. cut. et syphil.	JOULIA
Clin. des mal. des voies urin.	DARGET
Clin. des mal. nerv. et ment.	DELMAS-MARSALET
Clin. d'oto-rhino-laryngologie	G. PORTMANN
Toxicologie et hygiène appliquée.	CASTAGNOU
Clinique odonto-stomatologique	DUBECQ
Botanique et cryptogamie	GIRARD
Thérapeutique	F.-J. TRAISSAC
Hydrologie thérap. et climatol.	DUBARRY
Carcinologie	LACHAPELE
Physique pharmaceutique	BLANQUET (T.P.).
Immunologie	PAUTRIZEL (T.P.).
Bactériologie	MOUSTARDIER.
Hydrologie pharmaceutique	CAZAUX (T.P.).

PROFESSEURS SANS CHAIRE :

M. MAHON (Obstétrique), Mlle ROUGIER (Physiologie), MM. LAUMONIER (Médecine opératoire), DESPONS (O.-R.-L.).

MAITRES DE CONFÉRENCES AGRÉGÉS :

	MM.
Anatomie	RIGAUD, CABANIE
Biochimie médicale	NEUZIL
Pathologie expérimentale	FAURE

	MM.
Physique médicale	DUHAMEL
Pharmacie (1re Section)	R. GOLSE, ROMAIN
Pharmacie (2e Section)	QUILICHINI.
Histologie	STOLL

CHARGÉS DES FONCTIONS DE MAITRES DE CONFÉRENCES AGRÉGÉS :

MM. MARQUEVIELLE (Biologie médicale); BIRABEN (Anatomie pathologique).

AGRÉGÉS, EN EXERCICE :

	MM.
Médecine générale	BERGOUIGNAN, LENG-LEVY, LAVIGNOLLE, MARTIN-DUPONT, DAVID-CHAUSSE, J. RIVIERE
Chirurgie générale	CHAVANNAZ, VILLAR, TINGAUD, DEPAULIS, DARMAILLACQ

	MM.
Obstétrique	CHASTRUSSE, FAUGERE
Ophtalmologie	CORCELLE
Oto-rhino-laryngologie	M. PORTMANN
Dermatologie et syphiligraphie	LE COULANT
Pédiatrie et puériculture	VERGER
Méd. légale et méd. du travail.	L'EPEE
Odonto-stomatologie	BENOIT
Urologie	LANGE
Neurologie et psychiatrie	BLANC
Pneumo-phtisiologie	FREOUR

COURS COMPLÉMENTAIRES :

	MM.
Accouchements	CHASTRUSSE, FAUGERE
Puériculture	VERGER, PERY
Législation pharmaceutique	COUSTOU
Cryptogamie	LAUBIE
Obstétricie sociale	MAHON
Organographie et physiol. végét.	TEMPERE
Chimie biologique analytique	NIVET
Chimie analytique	BABIN, VILLAR
Pathologie chirurgicale	CHAVANNAZ, TINGAUD, LAPORTE
Zoologie pharmaceutique	BAILENGER

	MM.
Physiologie	Mme LINQUETTE
Toxicologie et Hygiène	Mlle LARCEBAU
Phytopharmacie	CORTESI
Droit médical international	AUBY
Médecine légale	L'EPEE
Séméiologie médicale	RIVIERE (J.).
Séméiologie chirurgicale	DEPAULIS
Embryologie	STOLL
Pathologie médicale	BERGOUIGNAN, LENG-LEVY, LAVIGNOLLE
Médecine opératoire	LAUMONIER.
Oto-rhino-laryngologie	DESPONS.
Bactériologie	DULONG DE ROSNAY.

Le Secrétaire principal de la Faculté : ANDRÉ GAYRAUD.

Par délibération du 5 août 1879, la Faculté a arrêté que les opinions émises dans les Thèses qui lui sont présentées doivent être considérées comme propres à leurs auteurs, et qu'elle entend ne leur donner ni approbation, ni improbation.

A MON PERE

Ancien Interne des Hôpitaux de Paris,
Ancien Chirurgien-chef de l'Hôpital d'Albi,
Officier de la Légion d'honneur.

Dont la haute valeur professionnelle, le dévouement et l'abnégation envers ses malades ont éveillé en moi la vocation médicale.

Puissé-je suivre l'exemple qu'il m'a si magnifiquement donné.

Je lui dédie ce travail en témoignage de mon admiration et de ma profonde affection.

A MA MERE

En gage de filiale affection, expression trop modeste de mon immense gratitude.

A MON ONCLE ET A MA TANTE

A qui j'exprime ici toute ma reconnaissance.

A TOUS LES MIENS

A MES AMIS

A NOS MAITRES DE LA FACULTE
ET DES HOPITAUX DE BORDEAUX

A NOS JUGES :

Monsieur le Docteur J. DUHAMEL

Maître de Conférences,
Agrégé de Physique médicale,
Ancien Elève de l'Ecole Polytechnique.

Votre amicale bienveillance nous a été d'un précieux secours tout au long de nos études médicales.

Les directives et les encouragements que vous nous avez si aimablement prodigués à l'occasion de ce travail ont considérablement simplifié notre tâche.

Soyez assuré de notre sincère gratitude et de notre respectueux attachement.

Monsieur le Professeur P. BLANQUET

Professeur de Physique pharmaceutique,
Docteur ès sciences.

Nous le remercions de l'honneur qu'il nous a fait en acceptant d'être notre juge et le prions d'accepter l'hommage de notre respectueuse reconnaissance.

Monsieur le Professeur J. REBOUL

Professeur d'Electro-Radiologie
et de Clinique d'Electricité médicale,
Officier des Palmes académiques.

Nous ressentons très vivement l'honneur que vous nous avez fait en acceptant de juger ce modeste travail.

Ayant la joie et la fierté de compter au nombre de vos élèves, qu'il nous soit permis de vous exprimer notre reconnaissance pour le remarquable enseignement que vous nous dispensez au cours de nos études d'électro-radiologie.

Nous vous prions de bien vouloir trouver ici l'expression de notre gratitude et de notre dévouement.

A NOTRE PRESIDENT DE THESE

Monsieur le Professeur PIFFAULT

Professeur de Physique médicale et pharmaceutique,
Chevalier de la Légion d'honneur,
Croix de guerre,
Officier des Palmes académiques.

Mon Cher Maître,

Nous vous sommes profondément reconnaissant de l'honneur que vous nous avez fait en nous confiant ce travail et en acceptant de présider cette thèse.

Nous tenons à vous témoigner ici notre profonde gratitude pour vos précieux enseignements, l'accueil qui nous a toujours été réservé dans votre Laboratoire et les judicieux conseils que vous avez bien voulu nous prodiguer.

ÉTUDE DU COMPORTEMENT DES CELLULES PHOTO-VOLTAÏQUES SOUS L'ACTION DES RAYONS X

INTRODUCTION

Depuis plusieurs années, et plus exactement depuis que l'on utilise les rayons X à des fins médicales, se pose le problème de la quantitométrie de ce rayonnement et celui d'un instrument de mesure robuste simple et précis.

La notion de quantité de rayonnement a été elle-même longtemps assez mal définie en pratique médicale. En fait, pour les physiciens, c'est une notion simple.

En effet, un faisceau de rayons X, que nous supposerons parallèles, peut être défini en quantité de deux façons relativement différentes :

1° En admettant que les différents effets biologiques et radiographiques sont dus à l'action du photon isolé, on peut définir l'intensité du faisceau de rayons X par le nombre de photons qui traversent un centimètre carré par seconde d'une surface disposée normalement au faisceau.

2° Mais un faisceau de rayons X est toujours hétérogène, c'est-à-dire qu'il contient des photons dont l'énergie individuelle peut varier dans des proportions assez grandes. De

ce fait, pour avoir une connaissance complète du faisceau de rayons X, il faudrait joindre à la notion précédente la distribution et le spectre énergétique de ce faisceau.

Ces deux types de connaissances étant difficiles à avoir simultanément, on peut utiliser, pour définir l'intensité du faisceau de rayons X, la notion de flux énergétique, c'est-à-dire la quantité d'énergie par centimètre carré et par seconde transportée par l'ensemble des photons.

On a ainsi une vue globale du rayonnement, qui ne peut cependant pas remplacer la connaissance exacte du nombre de photons et du spectre énergétique.

La difficulté pratique est de mesurer ce flux énergétique. La mesure directe étant impossible, on est amené à utiliser dans tous les cas l'artifice suivant :

Une partie du rayonnement est capturée par un corps absorbant, et cette énergie est consacrée à une modification physique ou chimique de ce corps, qui est détectée et mesurée par un appareil convenable.

Cette modification varie avec l'énergie cédée au corps absorbant, permet de la calculer, et, connaissant ce que représente dans les conditions de l'expérience l'énergie cédée par rapport à l'énergie totale, on peut calculer cette dernière.

Les différents types d'appareils destinés à la mesure des rayons X sont donc conditionnés par l'absorbeur, la modification qu'il subit et le détecteur de cette modification.

Le sujet radiographié ou soumis à un traitement par les rayons X absorbe lui-même de l'énergie rayonnée, laquelle entraîne les modifications et les effets radio-biologiques.

La dosimétrie radiologique médicale vise à avoir une connaissance de cette énergie absorbée, qui constitue au sens propre du terme la dose et qui est évaluée en rad :

$$1 \text{ rad} = 100 \text{ ergs/gr.}$$

Si l'absorption du corps utilisé pour la mesure était identique à celle du corps humain, le problème de la mesure

de la dose reçue par celui-ci serait très simplifié, car la simple lecture de l'appareil de mesure donnerait la dose absorbée sans qu'il soit nécessaire de passer par l'intermédiaire (même si, dans la pratique, il reste sous-entendu) de l'énergie réelle du faisceau.

En d'autres termes, on peut schématiser les opérations de la façon suivante :

Mesure → dose absorbée par l'appareil de mesure.

Dose absorbée par l'appareil de mesure
+ connaissance de la loi d'absorption de l'appareil de mesure
= connaissance de l'énergie du faisceau.

Connaissance de l'énergie du faisceau
+ connaissance de la loi d'absorption du corps humain
= connaissance de la dose absorbée.

Tous ces intermédiaires entraînent une incertitude ou, pour parler langage moderne, des bruits supplémentaires sur l'information.

Le gain en sécurité d'information serait considérablement accru si l'on était sûr que l'appareil de mesure absorbe d'une façon identique au corps humain, ou si l'on avait au moins la certitude que l'absorption de l'appareil de mesure et celle du corps humain sont liées l'une à l'autre de façon simple, ce qui n'est pas le cas, comme l'ont montré Reboul et Duhamel.

En effet, et si l'on se tient uniquement au domaine des rayons assez peu énergiques utilisés par le médecin, le coefficient massique d'absorption d'un corps $\frac{\mu}{\rho}$ est la somme de deux termes.

— Le premier $\frac{\lambda}{\rho}$, qui est donné par la formule de Klein et Nishina, correspond à un mécanisme d'absorption dit par diffusion.

Cela veut dire que le photon incident donne, à la suite de mécanismes assez compliqués, dans le détail desquels nous

n'entrerons pas, un autre photon en général moins énergique et un électron (électron Compton).

L'énergie de cet électron est empruntée au photon incident, l'électron lui-même étant pris au milieu absorbant.

Cet électron cède pratiquement au milieu toute l'énergie dont il est porteur, ce qui entraîne une modification de ce milieu déjà perturbé par la mise en mouvement de l'électron.

Par conséquent, $\frac{\lambda}{\rho}$ est lui-même la somme de deux termes :

— l'un, qui correspond à la quantité d'énergie emportée par les photons diffusés, énergie qui n'est pas cédée au milieu;

— l'autre correspondant à l'énergie des électrons de recul, qui, par contre, est cédée au milieu et que seul connaît l'appareil de mesure utilisé.

Le deuxième terme $\frac{\tau}{\rho}$ correspond à l'absorption photo-électrique.

Un des électrons au repos sur la couche électronique définie par le niveau d'énergie W_0 capte le photon incident d'énergie $h\nu$ et emprunte une énergie $h\nu - W_0$ qu'il pourra céder au milieu absorbant déjà modifié par l'éjection du photo-électron.

Cette modification pourra se traduire soit par des phénomènes chimiques, nous y reviendrons, soit par l'émission d'un photon dont l'énergie est au plus égale à W_0 (photon de fluorescence).

L'énergie de ce photon n'est pas, sauf cas très particulier (effet Auger), réabsorbée par le milieu, et l'on arrive là encore à mettre $\frac{\tau}{\rho}$ sous forme de la somme de deux termes, l'un qui correspond à l'énergie absorbée sous forme de photo-électrons et qui seule est détectée par l'appareil de mesure, l'autre correspondant au rayonnement de fluorescence, énergie non absorbée.

L'appareil de mesure n'est sensible qu'aux effets produits

par les électrons (si l'on ne tient pas compte de la partie du rayonnement réémis et qui est éventuellement réabsorbée par le milieu) [1] et par leur arrachement lui-même, mais il est incapable, sauf cas spéciaux, de faire le départ entre ce qui est photo-électrons et ce qui est électrons de recul.

Ces phénomènes d'arrachement et d'absorption électroniques sont des ionisations : ionisation primaire produite par le rayonnement incident lors de la libération des électrons; ionisation secondaire produite par ces électrons.

Les ionisations se manifestent à l'extérieur, donc à l'appareil de mesure, soit sous forme électrique : apparition de charge ou d'un courant, soit sous forme chimique : changement de couleur, réaction dosable, effet photographique.

C'est l'effet électrique, et plus précisément l'ionisation de l'air, qui sert à définir l'unité d'exposition utilisée journellement, unité qui est le roentgen.

Cette unité, rattachée à l'absorption vraie de l'air, ne permet pas de passer de façon commode à la dose reçue par le corps humain, tout au moins dans toute l'échelle des fréquences.

Dans le domaine du rayonnement médical, on peut cependant admettre que :

$$1\ r = 0{,}93\ \text{rad}.$$

L'objet du présent travail est de rechercher si l'effet photovoltaïque est un moyen commode de mesurer des roentgen sans vouloir chercher s'il nous donne une notion dépassant le roentgen et permettant de remonter à celle de dose.

(1) Dans tout ce qui suit, nous ne tenons pas compte du fait que les électrons peuvent, sans être absorbés, sortir du détecteur. Ces effets se passent dans la zone de transition, qui n'a des dimensions importantes que dans le cas de rayonnement très pénétrant. De tels effets ont pourtant été mis tout récemment en évidence: Moos (W. S.), The transition effect at low roentgen ray energies. *Am. J. roentgen.* 77, 1957, n° 5, p. 881-885.

METHODES DE MESURE DES RAYONS X

Nous allons faire une revue rapide des différents moyens qui ont été proposés pour évaluer l'intensité d'un faisceau de rayons X, aux restrictions près que nous venons d'énoncer.

1° Utilisation de la fluorescence.

Le faisceau de rayons X est reçu sur un écran fluorescent, et l'énergie X absorbée est transformée en lumière.

Un faisceau plus intense donnera une luminance de l'écran plus intense.

On peut mesurer cette luminance au moyen d'une cellule photo-électrique dont le courant de sortie lui sera en première approximation proportionnel.

On a ainsi construit une sorte de dosimètre que l'on peut étalonner par rapport à une chambre d'ionisation.

Ce système n'est pas entré dans la pratique, car, s'il est qualitatif (enregistrant les variations de luminance), sa valeur quantitative est douteuse. En particulier, nous devons signaler que la luminance d'un écran tend vers une saturation quand tous les centres luminescents sont excités.

Il est assez vraisemblable qu'il pourrait être repris avec les amplificateurs de brillance ou par utilisation de l'effet Destriau : apparition de centres lumineux dans un milieu semi-conducteur soumis à des champs électriques.

De toute façon, il ne saurait s'appliquer qu'à des mesures d'intensité assez faibles.

A l'encontre de ce système, on peut mentionner que les récents posemètres allemands et scandinaves utilisent un phénomène inverse : le faisceau de rayons X tombant sur

une chambre d'ionisation qui traduit le courant d'ionisation en luminance. Le mécanisme est donc strictement inverse de celui qu'on pouvait proposer.

2° Utilisation d'effets chimiques.

Ils ne peuvent être utilisés que pour des quantités très importantes de rayons X et nécessitent des dosages chimiques ou photométriques assez délicats. Nous n'en parlerons pas ici

3° Utilisation de la plaque photographique.

Un grain de bromure d'argent de l'émulsion frappé par un photon devient développable, et les manipulations photographiques le transforment en grain d'argent opaque.

Pour la lumière visible, un photon transforme un grain de bromure d'argent, et l'on dit que le rendement quantique est égal à 1 (il peut même, pour certaines radiations, être inférieur à 1).

Pour les rayons X le phénomène est plus complexe, car le photon traverse le grain de bromure en y laissant simplement une partie de son énergie. Cette énergie absorbée contribue à former divers électrons, qui peuvent chacun rendre développable un grain de bromure. De ce fait, le rendement quantique d'un photon X d'énergie usuelle en radio-diagnostic et en radiothérapie est de l'ordre de 2 000.

En d'autres termes, un simple photon X est capable de rendre développables 2 000 grains de bromure d'argent.

Mais, contrairement à ce que l'on pourrait croire, étant donné qu'un photon X de ce type peut posséder une énergie de l'ordre de 80 000 *e*V, tandis qu'un photon de lumière visible possède une énergie de l'ordre de 1 *e*V, le nombre de grains développables par électron-vol est de $\frac{2\,000}{80\,000}$, soit cinq fois plus petit que pour un photon de lumière visible.

Le rendement énergétique des rayons X est donc environ cinq fois plus petit que celui de la lumière. Ceci n'étant évidemment qu'un ordre de grandeur.

L'intérêt de l'émulsion photographique en dosimétrie est que la densité optique y est proportionnelle au nombre de grains d'argent libérés, à cause de l'épaisseur de l'émulsion et du fait que par leur pénétration les rayons X rendent développables des grains de bromure d'argent profonds.

Contrairement à ce qui se passe lors de l'action de la lumière sur l'émulsion photographique, il n'y a pratiquement pas d'inertie, et la densité optique est pour des énergies assez faibles, proportionnelle à l'énergie du rayonnement X (Silberstein).

On a donc la chance que la plaque photographique puisse être facilement étalonnée avec une chambre d'ionisation, tout au moins pour les énergies photoniques du type courant

L'inconvénient de la plaque photographique réside dans le fait qu'elle conduit assez rapidement à une saturation. Pour une certaine énergie E du faisceau de rayons X, tous les grains de bromure d'argent sont rendus développables. Si on augmente alors E, le noircissement ne change plus.

Cette saturation se produit assez vite, c'est-à-dire pour des expositions de l'ordre du roentgen. On ne peut donc pas faire de mesures photométriques précises (ce qui est le but recherché) si la densité optique du film dépasse 1. D'autre part, le film devant être maintenu à l'abri de la lumière, il faut qu'il soit placé dans un sachet standard qui filtre le rayonnement primaire. Les indications fournies dépendent alors de la nature de cette enveloppe.

On a donc renoncé en dosimétrie à l'emploi du film photographique.

Par contre, il est utilisé sur une grande échelle comme méthode de zéro ou presque de zéro dans les études de protection du personnel et du public. On a même proposé de se servir de films d'amateur pour tester la radio-activité sur la périphérie des zones contaminées par une bombe atomique.

4° Utilisation des cellules photo-électriques.

Ces cellules sont de deux sortes :

a) *Les cellules photo-émissives.*

Elles sont constituées d'une ampoule de verre dans laquelle on a fait le vide.

Le rayonnement incident tombant sur une électrode métallique reliée au pôle négatif d'un générateur de courant continu, arrache des électrons, qui sont captés par une autre électrode reliée au pôle positif du générateur.

Le courant ainsi produit est proportionnel à l'énergie lumineuse incidente.

On remarquera l'analogie avec la mesure à la chambre d'ionisation (arrachement à un milieu matériel, la cathode, d'électrons par des photons incidents).

Mais cette analogie ne persiste pas dans le détail des phénomènes, car les photons incidents consacrent leur énergie, non pas tellement à l'arrachement d'électrons, puisque dans un milieu métallique il y a une grande quantité d'électrons libres ou très peu liés appartenant aux couches superficielles des atomes, mais à donner à ces électrons libres une énergie suffisante pour franchir la barrière de potentiel existant à la surface du métal.

Les objections que l'on peut faire à l'utilisation de ces cellules sont :

1° Leur sensibilité faible (mais on a construit des cellules à gaz plus sensibles dont la réponse n'est plus linéaire en fonction de l'énergie incidente);

2° La nécessité d'un circuit électronique pour la polarisation de la cellule et pour l'amplification du courant produit;

3° Leur fragilité.

Elles n'ont pas servi, en particulier pour la mesure des rayons X, car les photons X ont des propriétés ionisantes

différentes de celles des photons lumineux : ils sont capables d'arracher des électrons des couches profondes de l'atome. Par conséquent, le mécanisme de libération des électrons qui forme le courant mesuré est profondément perturbé.

On est d'ailleurs obligé de protéger la cellule contre l'action de la lumière et l'on se heurte à une objection analogue à celle rencontrée à propos des films photographiques.

b) *Les cellules photo-voltaïques.*

Elles offrent *a priori* les mêmes inconvénients liés à la protection de la cellule contre la lumière et à la libération des électrons des couches profondes des atomes. Cependant, la robustesse de ces cellules, le fait que l'on ne doive pas prévoir de circuit de polarisation et d'amplification en font un outil particulièrement intéressant à examiner dans ses rapports avec les rayons X. Cet examen avait déjà été fait par Salaün et a été repris en détail par Blet au cours de travaux récents.

Dans le présent travail, nous avons l'intention de confronter les résultats de ces auteurs et d'essayer d'en dégager des idées d'application pratique.

Nous n'avons pas pu nous livrer à l'étude expérimentale qui était dans nos intentions, par suite de travaux de réfection du laboratoire de physique ayant entraîné le démontage des installations électriques.

NATURE ET CONSTITUTION DES CELLULES PHOTO-VOLTAIQUES

L'effet photo-électrique peut être défini comme étant le phénomène par lequel une radiation électro-magnétique est susceptible de libérer des électrons d'un métal ou d'un semi-conducteur.

La cellule photo-voltaïque à couche d'arrêt se comporte, en présence d'un rayonnement électro-magnétique, comme un générateur autonome de courant continu.

Du fait de leur stabilité, de leur faible inertie et de la valeur relativement élevée du courant produit, ces cellules ont un champ d'application très étendu.

En effet, ce courant est de l'ordre de 10^{-6} à 10^{-5} A et permet d'attaquer directement un galvanomètre.

La fabrication des cellules photo-voltaïques fait appel à certains corps : les semi-conducteurs, dont nous préciserons plus loin les propriétés électriques particulières. De nombreux semi-conducteurs ont été expérimentés.

Le sélénium et l'oxyde cuivreux Cu_2O se sont révélés particulièrement intéressants à l'emploi, mais on a proposé également, ce qui a un gros intérêt biologique, des substances à échanges électroniques faciles comme les indicateurs d'oxydo-réduction et même la chlorophylle.

Noddack a d'ailleurs pu construire des cellules photo-électriques avec des colorants utilisés pour la photographie en couleur.

Toute substance réagissant à l'impact de photons par mutation électronique moléculaire est donc capable de former une cellule photo-voltaïque.

Deux types de cellules sont utilisés :

— les cellules au sélénium;
— les cellules à l'oxyde cuivreux, mais ces dernières tendent à disparaître, et les cellules photo-voltaïques modernes sont généralement au sélénium.

La constitution d'une cellule photo-voltaïque est la suivante : une couche de métal, ou contre-électrode, est séparée d'un corps semi-conducteur par une mince couche isolante qui porte le nom de couche d'arrêt.

Les électrodes sont reliées, d'une part, à la contre-électrode et, d'autre part, au semi-conducteur par l'intermédiaire d'une couche de métal qui lui sert de support (fig. 1).

Fig. 1. — Coupe schématique d'une cellule au sélénium.

Pour que l'effet photo-électrique soit possible, il faut que le rayonnement tombant sur la cellule parvienne au semi-conducteur.

Selon le sens de cette pénétration, on distingue deux sortes de cellules à couche d'arrêt :

a) les cellules dites antérieures, dans lesquelles le rayonnement traverse successivement la contre-électrode et la couche d'arrêt;

b) les cellules dites postérieures, dans lesquelles le rayonnement traverse la couche de métal accolée au semi-conducteur.

Suivant le type de cellule envisagé, la contre-électrode ou la couche de métal auront une épaisseur suffisamment faible pour permettre la transmission du rayonnement.

Dans le cas de l'utilisation des rayons X, cette dernière

considération est assez secondaire, et il serait intéressant de pouvoir utiliser des cellules photo-électriques spécialement conçues à cet usage, mais une telle fabrication n'est pas possible au laboratoire.

Sans nous attarder sur les procédés de fabrication, dont certains détails sont tenus secrets par les firmes intéressées, disons simplement que, dans le cas d'une cellule antérieure, la couche métallique servant de support est réalisée en fer et en aluminium. La surface du semi-conducteur subit un traitement approprié qui crée à ce nouveau une pellicule isolante faisant office de couche d'arrêt. Quant à la contre-électrode métallique, elle consiste en un fin dépôt d'or ou de platine obtenu par évaporation dans le vide ou pulvérisation cathodique. L'ensemble est recouvert de vernis protecteur et placé dans un boîtier.

ETUDE DE L'EFFET PHOTO-VOLTAIQUE

L'effet photo-voltaïque à couche d'arrêt fut découvert, en 1875, par Adam et Day et confirmé, en 1884, par Fritts.

Si les propriétés optiques de la lumière avaient reçu une explication satisfaisante à l'aide de la théorie ondulatoire, par contre, l'effet photo-électrique ne semblait relever que de la seule théorie corpusculaire de la lumière.

La remarquable théorie de la mécanique ondulatoire de Louis de Broglie a permis de concilier ces deux aspects en associant à une vibration de fréquence ν un corpuscule ou photon dont l'énergie $h\nu$ est égale au produit de la fréquence de la radiation par une constante universelle appelée constante de Planck.

L'étude des conséquences pratiques de l'effet photo-électrique est assez récente et n'a été rendue possible que par la fabrication industrielle de cellules ayant des caractéristiques comparables entre elles.

Parmi les nombreux auteurs s'étant intéressés à ce problème nous pouvons citer ici les noms de Houson, Bergmann, Wilson, Mott et plus récemment G. Blet.

Avant d'étudier le mécanisme de l'effet photo-électrique, nous allons rappeler brièvement les récentes théories sur la constitution électrique de la matière.

On admet que tout corps solide se comporte, au point de vue électrique, comme formé d'une succession de bandes énergétiques.

L'origine de ces bandes résulte de la mise en commun des couches les plus externes des atomes du cristal.

Il est en effet impossible de se représenter les atomes sous forme d'un empilement plus ou moins régulier de petites billes bien délimitées.

Si les électrons proches du noyau occupent une position assez bien définie ne leur permettant pas de passer dans l'atome voisin, il y a, par contre, interpénétration des niveaux d'énergie les plus élevés, de telle sorte qu'un électron n'est pas rattaché à un atome déterminé, mais à un niveau d'énergie commun aux divers atomes du cristal.

Soit 2 atomes à l'état libre (fig. 2).

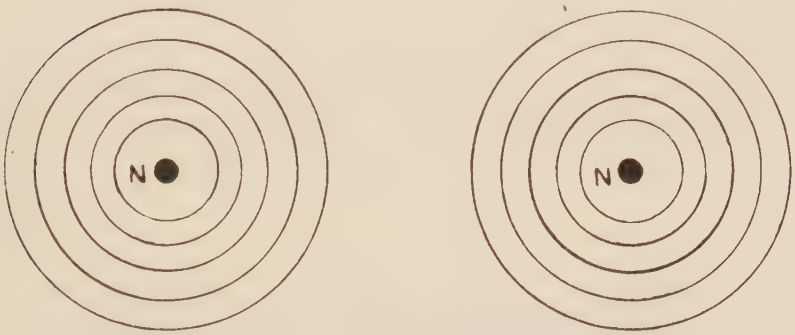

Fig. 2.

A l'état solide, nous avons la représentation donnée par la figure 3.

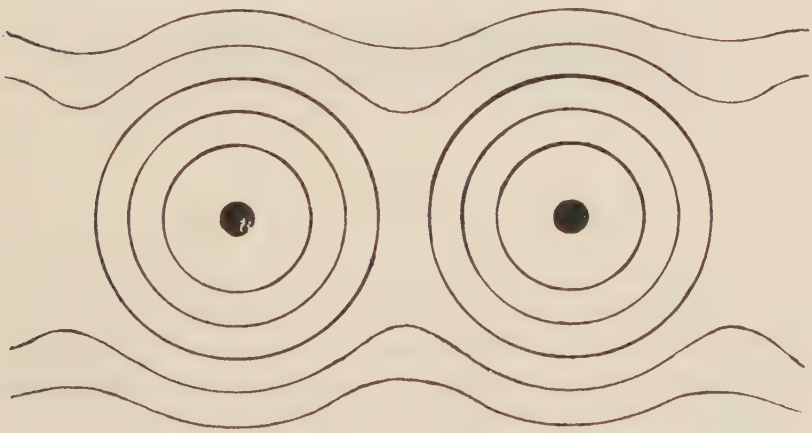

Fig. 3.

Suivant les caractéristiques de ces bandes, on classe les corps en :

— isolants;

— semi-conducteurs;

— conducteurs.

a) *Les isolants.*

Ils sont constitués de bandes alternées dont les niveaux énergétiques sont très différents. Ainsi, sur la figure 4, les états énergétiques de la bande A sont tous occupés.

Par contre, la bande énergétique B est libre.

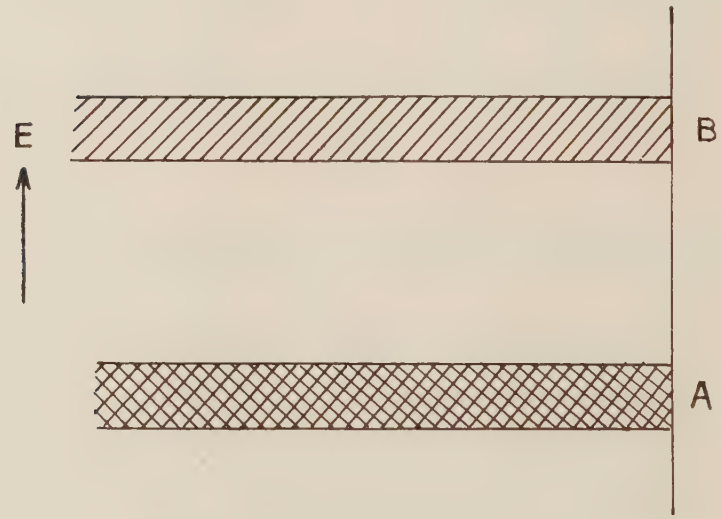

Fig. 4.

Si nous soumettons ce corps à une différence de potentiel, il ne se produira aucun passage de courant.

En effet, l'énergie fournie par le champ électrique est trop faible pour permettre à un électron de la bande A de parvenir à un état énergétique plus élevé de la bande B. Le corps se comporte donc comme un isolant.

b) *Les semi-conducteurs.*

Ils ont une structure peu différente de celle des isolants. Comme eux, ils possèdent des bandes énergétiques alternativement libres et occupées, mais leurs propriétés particulières proviennent de l'inclusion dans le semi-conducteur de substances étrangères ou impuretés en quantité infinitésimale.

Ces impuretés viennent perturber la régularité des niveaux d'énergie, comme si, dans la figure 2, on supposait un atome nettement plus grand ou plus petit que les autres.

Il en résulte des états électroniques dont l'énergie est intermédiaire à celle des bandes A et B (fig. 5).

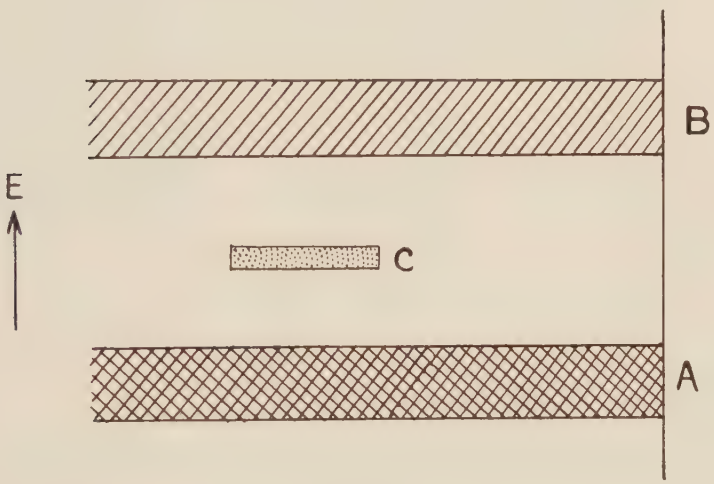

Fig. 5.

La bande C ainsi créée sera susceptible, du fait de sa position, de céder un petit nombre d'électrons à la bande inoccupée B.

Il en résultera la possibilité de passage d'un courant.

c) *Les conducteurs.*

On admet, dans le cas d'un corps conducteur, qu'il n'existe plus de solution de continuité entre les différentes bandes énergétiques (fig. 6).

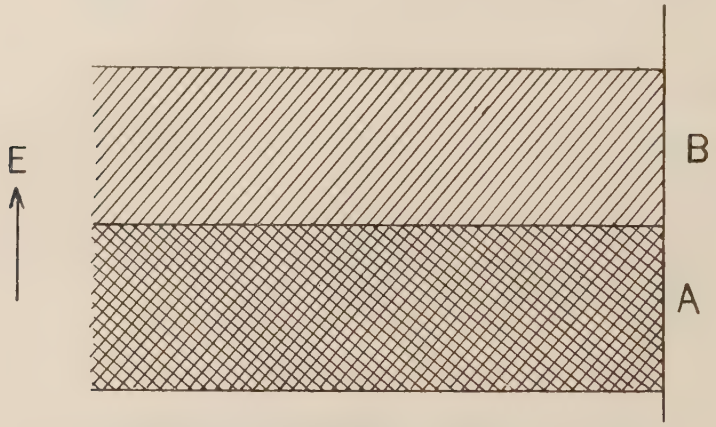

Fig. 6.

Tout se passe donc comme si l'on avait affaire à une bande unique dont les états énergétiques variaient de façon continue.

Un léger accroissement de l'énergie d'un électron, créé par exemple par un champ électrique, sera suffisant pour permettre à cet électron de se déplacer en accédant à un état énergétique légèrement supérieur.

La résistance opposée par ce corps au passage d'un courant sera donc très faible.

Nous sommes en présence d'un conducteur.

Dans cette étude, nous n'avons pas fait intervenir le facteur température.

Il est évident que l'élévation de celle-ci, en augmentant l'énergie moyenne des électrons, entraîne une diminution de la résistance. Ces modifications de la conductibilité sont cependant trop faibles pour perturber les caractéristiques globales du corps.

Ayant ainsi schématisé la constitution des différents corps composant une cellule photo-électrique, nous pouvons essayer de donner une interprétation des divers phénomènes aboutissant à l'apparition de l'effet photo-voltaïque.

Prenons le cas d'une cellule photo-électrique de type antérieur.

La figure 7 nous montre la disposition des diverses couches de la cellule.

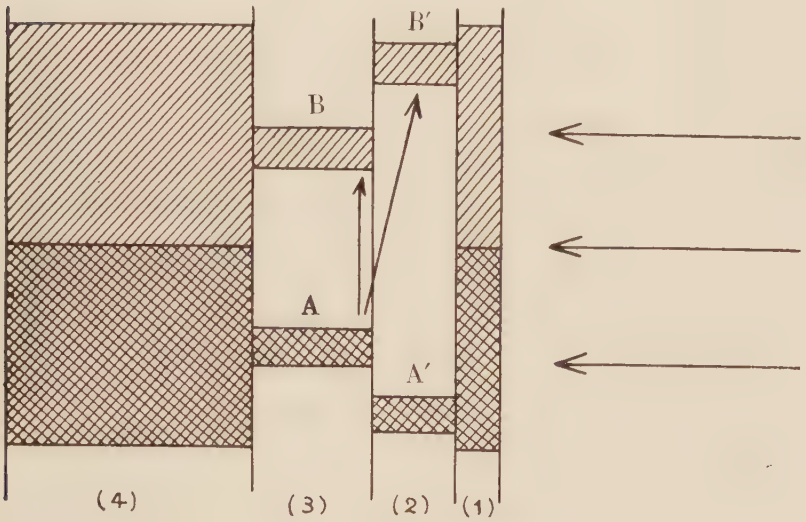

Fig. 7.

La radiation électro-magnétique traverse successivement la contre-électrode métallique (1), la couche d'arrêt (2) et parvient dans le semi-conducteur (3) ou, plus exactement, dans la partie du semi-conducteur située au contact de la couche d'arrêt.

A ce niveau, sous l'action des photons incidents, quelques électrons de la bande occupée A vont acquérir une énergie suffisante pour aller coloniser la bande libre B.

Parallèlement, d'autres électrons vont atteindre la bande libre B′ de la couche d'arrêt et de là passeront dans la contre-électrode métallique.

Le semi-conducteur est donc le siège de deux phénomènes distincts :

1° Les électrons allant de A vers B accroissent la conductibilité du semi-conducteur et créent un effet photo-électrique interne dont l'apparition est lente;

2° Les électrons qui, à travers la couche d'arrêt, se dirigent vers la contre-électrode métallique créent l'effet photo-électrique à couche d'arrêt, lequel se produit dès l'éclairement de la cellule.

En effet, si nous relions la contre-électrode (1) et la couche métallique (4) aux bornes d'un circuit électrique peu résistant, les électrons accumulés sur la contre-électrode emprunteront ce chemin pour retourner vers la couche métallique et le semi-conducteur. Un galvanomètre branché en série sur ce circuit extérieur accusera le passage d'un courant; par contre, si la résistance du circuit extérieur est grande par rapport à la résistance interne de la cellule, un certain nombre d'électrons franchiront à nouveau la couche d'arrêt pour regagner le semi-conducteur.

Soit $h\nu$ le quantum d'énergie du photon incident; on a, selon la formule d'Einstein :

$$h\nu = 1/2\ mV^2 + W,$$

où : h = constante de Planck;

ν = fréquence de la radiation;

$1/2\ mV^2$ = énergie cinétique de l'électron libéré;

W = travail nécessaire pour arracher un électron planétaire de son orbite.

L'électron libéré aura donc une énergie cinétique :

$$1/2\ mV^2 = h\nu - W.$$

Le travail d'extraction de l'électron (W) étant une constante du semi-conducteur, pour que l'effet photo-électrique soit possible, l'énergie ($1/2\ mV^2$) acquise par l'électron devra

être suffisante pour l'emmener de la bande A du semi-conducteur à la bande B′ de la couche d'arrêt.

Cette condition sera réalisée si l'on a :

$$h\nu > h\nu_0$$

ν_0 étant la fréquence minimum de la radiation permettant le déclenchement de l'effet photo-électrique.

Par conséquent, l'effet photo-électrique ne peut se produire que si la fréquence de la radiation incidente est supérieure à une fréquence seuil fonction de la nature du semi-conducteur.

La théorie des bandes, dont nous n'avons reproduit que l'aspect qualitatif, est étayée par de solides considérations de mécanique ondulatoire, ainsi que par des spectres électroniques dans les cristaux.

Son étude a été particulièrement poussée par Mott, et elle joue un rôle important dans la théorie de l'effet photographique de la lumière (théorie de Gurney Mott).

Pour l'exposé de cette théorie, nous renvoyons à la thèse de Delorme.

Il est intéressant de signaler cette parenté entre l'effet photographique et l'effet photo-voltaïque, qui sont deux aspects différents de la réaction d'un corps solide soumis à un bombardement photonique.

Nous retrouvons des analogies entre la cellule photovoltaïque et l'effet photographique, en particulier l'existence d'une saturation.

CARACTERISTIQUES
DES CELLULES PHOTO-VOLTAIQUES

La cellule photo-voltaïque étant assimilable à un générateur, nous insisterons particulièrement sur l'intensité et la tension du courant, la valeur de la résistance interne et la puissance débitée.

1° Valeur de l'intensité du courant en fonction de l'éclairement en lumière blanche pour diverses valeurs de la résistance externe du circuit.

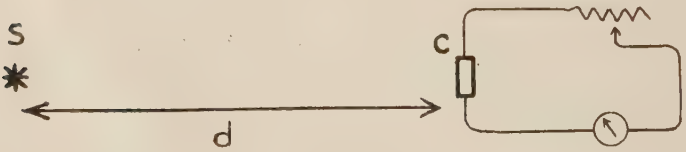

Fig. 8.

Une ampoule électrique placée en S envoie sur la cellule C un rayonnement dont l'intensité est en fonction inverse du carré de la distance qui sépare C de S (fig. 8).

Le courant produit par la cellule est mesuré par un micro-ampèremètre de faible résistance interne. Un rhéostat permet de faire varier la résistance externe du circuit.

En portant sur la figure 9 en abscisse l'éclairement mesuré en lux et en ordonnée l'intensité du courant mesurée en

microampères, nous obtenons une série de courbes correspondant aux différentes valeurs de la résistance externe du circuit.

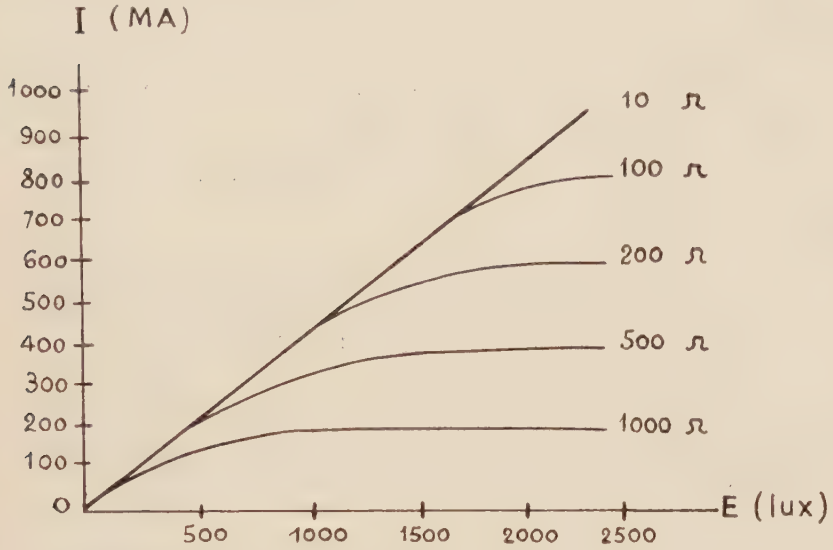

Fig. 9.

L'étude de la figure montre que, pour de très faibles valeurs de la résistance extérieure, la courbe est rectiligne. Le courant produit est alors proportionnel à l'éclairement, quelle que soit l'intensité de celui-ci.

Par contre, pour des valeurs relativement élevées de la résistance extérieure, la courbe s'infléchit. La proportionnalité n'est alors conservée que pour les faibles éclairements, et cette portion rectiligne de la courbe est de plus en plus courte à mesure qu'augmente la résistance du circuit.

Cette perte de linéarité s'explique par l'apparition d'un courant dit de conduction.

En effet, si le circuit extérieur oppose une trop grande résistance au passage des électrons accumulés sur la contre-électrode, ceux-ci vont emprunter un chemin plus facile

et retourner au sélénium en traversant à nouveau la couche d'arrêt.

Ce courant de conduction est fonction de la différence de potentiel aux bornes de la cellule et de l'éclairement qui facilite ce retour en arrière des électrons.

Le courant mesuré peut donc être considéré comme la somme algébrique de deux courants :

a) un courant photo-voltaïque proportionnel à l'éclairement;

b) un courant de conduction de sens contraire au précédent et approximativement proportionnel au carré de la tension aux bornes de la cellule.

Tout récemment, Wyatt a conçu un circuit électronique permettant d'améliorer la linéarité des cellules photovoltaïques.

2° Valeur de la tension en fonction de l'éclairement en lumière blanche pour diverses valeurs de la résistance extérieure.

Pour mesurer la différence de potentiel fournie par la cellule, on peut soit utiliser un millivoltmètre très résistant, soit faire débiter cette cellule sur une forte résistance et mesurer la tension aux bornes de celle-ci par une méthode d'opposition.

On réalise ainsi ce que les électriciens appellent une mesure en circuit ouvert.

La résistance extérieure du circuit étant très élevée, nous retrouvons ici le phénomène de saturation, dont nous avons parlé plus haut.

Aux très faibles éclairements, le tracé est linéaire. Par contre, si l'on augmente l'éclairement, la courbe s'infléchit rapidement et tend vers une valeur limite.

La figure 10 donne la valeur de la différence de potentiel pour diverses valeurs de la résistance extérieure.

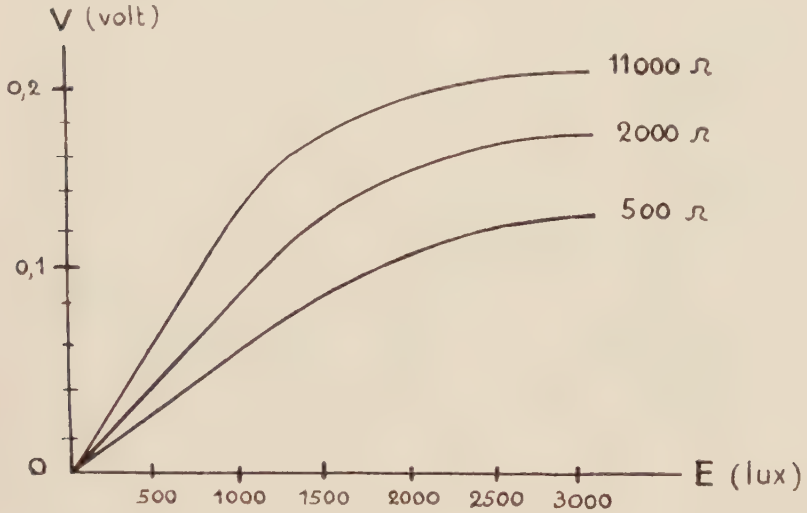

Fig. 10.

3° **Puissance débitée par la cellule en fonction de l'éclairement en lumière blanche pour diverses valeurs de la résistance externe du circuit.**

Pour un éclairement donné, la puissance fournie par la cellule est fonction de la valeur de la résistance externe du circuit. L'aspect en clocher de la courbe montre qu'il existe une valeur optima de cette résistance pour laquelle la puissance débitée est maximum.

Si l'on augmente l'éclairement, on constate que la puissance est maximum pour des valeurs de plus en plus faibles de la résistance extérieure.

La figure 11 montre les variations de cette puissance en fonction de la résistance externe du circuit pour des éclairements de 1 500, 2 500, 3 500 et 5 000 lux.

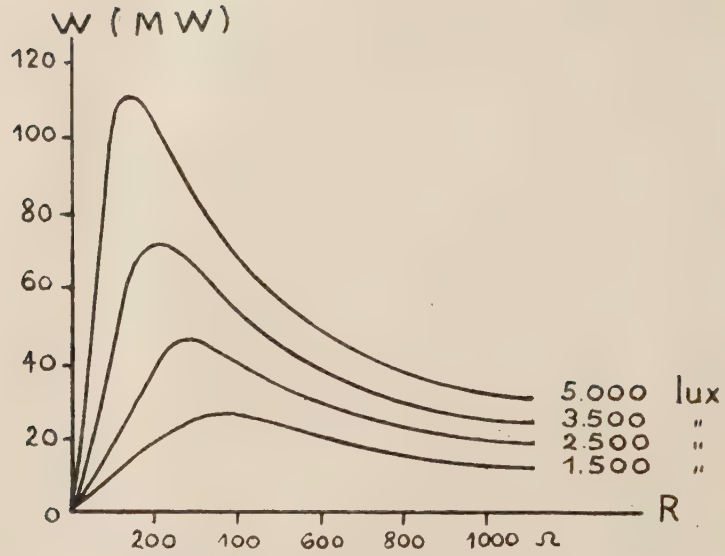

Fig. 11.

4° Valeur de la résistance interne et de la capacité interne des cellules photo-voltaïques.

Un résultat bien connu de la théorie des générateurs dit que la puissance débitée est maximum lorsque la résistance du circuit est identique à la résistance interne du générateur.

Ceci explique les maxima obtenus sur la figure précédente pour des éclairements constants et permet d'avoir une première approximation de la résistance interne.

Nous allons rapporter ici les résultats de mesures effectuées par Blet au cours de travaux expérimentaux récents. Cet auteur utilise une méthode plus précise basée sur le comportement de la cellule alimentée par un courant sinusoïdal. Cette méthode permet simultanément la mesure de la résistance interne et de la capacité de la cellule qui se comporte comme un condensateur à fuite.

a) *Variations de la résistance interne et de la capacité d'une cellule plongée dans l'obscurité lorsqu'elle est soumise à un courant de polarisation.*

Les indications recueillies montrent qu'une polarisation positive entraîne une augmentation de la résistance et une diminution de la capacité.

Par contre une polarisation négative entraîne une diminution de la résistance et une augmentation de la capacité

A titre d'indication d'ordre de grandeur, pour une polarisation de :

— 200 mV : R = 13 000 Ω, c = 0,229 MF;
0 mV : R = 90 000 Ω, c = 0,175 MF;
+ 400 mV : R = 200.000 Ω, c = 0,149 MF.

b) *Variations de la résistance interne et de la capacité en fonction de l'éclairement.*

Une augmentation de l'éclairement de la cellule entraîne une diminution de la résistance interne et une augmentation de la capacité.

Au cours de cette étude, Blet a constaté que, si les valeurs de la capacité et de la résistance interne s'établissent instantanément dès l'éclairement de la cellule, par contre, après la cessation de cet éclairement, elles subissent une décroissance lente.

Ce n'est qu'au bout de deux à trois heures que la cellule a retrouvé ses caractéristiques d'obscurité.

3° Sensibilité spectrale des cellules photo-voltaïques.

La sensibilité spectrale des cellules photo-voltaïques est légèrement supérieure à celle de l'œil. Elle s'étend approximativement de l'ultra-violet de 3 000 Å à l'infra-rouge de 7 000 Å (fig. 12).

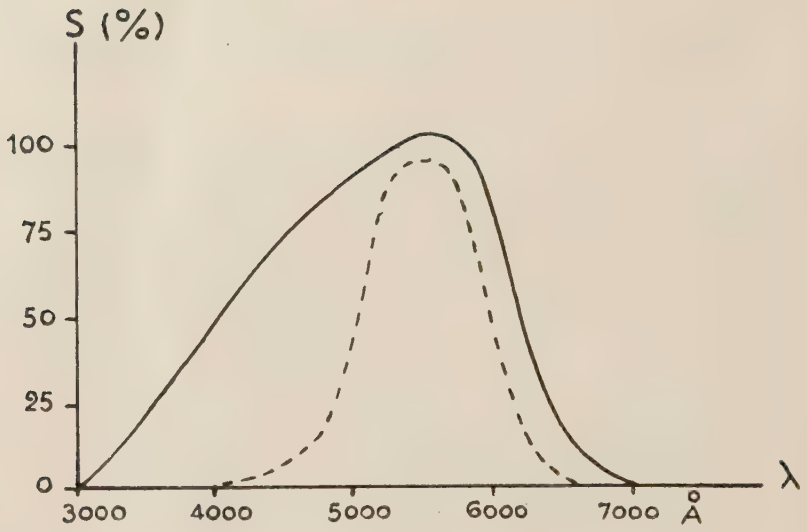

Fig. 12.

— *En traits pleins*, courbe de sensibilité d'une cellule au sélénium;

— *En traits pointillés*, courbe de sensibilité de l'œil.

En outre, les cellules photo-voltaïques sont également sensibles à l'action des rayons X.

Nous étudierons en détail ce phénomène dans le chapitre suivant.

6° Coefficient de température, traînage, fatigabilité, stabilité, sensibilité des cellules photo-voltaïques.

Coefficient de température.

L'augmentation de température entraîne une diminution de la résistance interne des cellules, qui favorise le courant de conduction.

Si la résistance extérieure du circuit est faible, le coefficient de température est pratiquement nul.

Par contre, il augmente proportionnellement à l'éclairement et à la résistance externe du circuit.

Avec les cellules photo-voltaïques modernes, on peut considérer ce coefficient de température comme négligeable aux températures courantes.

Traînage.

Si l'on éclaire brusquement une cellule photo-électrique, le courant s'établit avec un certain retard et passe par un maximum avant de se stabiliser.

De même, lors de la suppression de l'éclairement, la disparition du courant n'est pas instantanée.

Cette « paresse » des cellules photo-électriques est d'autant plus accentuée que le courant est plus faible. Jointe à l'effet de capacité de ces éléments, elle limite leur emploi en lumière modulée de fréquence élevée

Fatigue.

Une cellule soumise à un éclairement constant pendant un temps suffisamment long présente un phénomène de fatigue se traduisant par une légère diminution du courant débité.

Nous avons groupé ces différentes caractéristiques sur la figure 13.

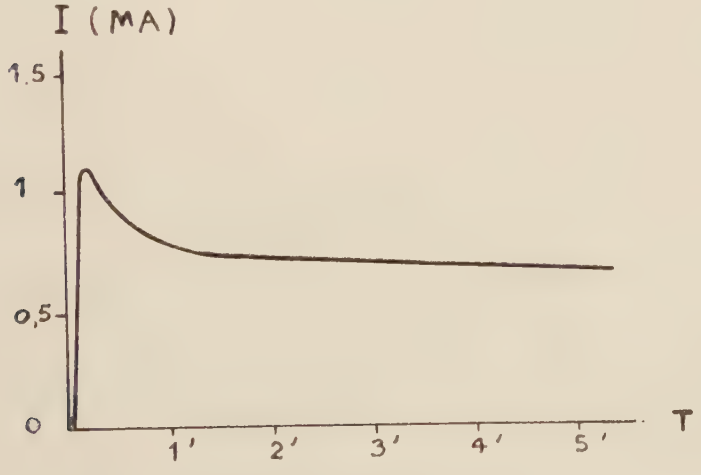

Fig. 13.

Stabilité.

Les cellules photo-voltaïques ont une sensibilité pratiquement constante dans le temps, à condition de ne les soumettre qu'à des éclairements modérés.

Par contre, les forts éclairements provoquent un effet d'éblouissement avec altération passagere ou définitive de la sensibilité.

Il est donc indiqué de conserver les cellules dans l'obscurité et de ne les exposer à la lumière que le temps nécessaire à la mesure.

Sensibilité.

Il est possible, à l'aide d'une cellule photo-voltaïque, d'obtenir des courants de l'ordre de 300 à 900 μA par lumen. Nous verrons qu'avec les rayons X ce courant est beaucoup plus faible, 2 à 3 μA environ.

ACTION DES RAYONS X
SUR LES CELLULES PHOTO-VOLTAIQUES

L'action des rayons X sur les cellules à couche d'arrêt a fait l'objet d'un travail expérimental de Salaün en 1933. Cette étude a été reprise par Blet en 1953.

Nous allons rapporter ici, en les comparant, les résultats obtenus par ces deux auteurs.

Montages utilisés.

Blet place une cellule au sélénium dans un boîtier étanche dont la fenêtre est constituée par une mince feuille d'aluminium de 1/10 mm d'épaisseur.

Cette cellule est soumise au rayonnement d'un tube de rayons X à anticathode de tungstène, dont la tension peut être poussée à 80 kV et le débit à 20 mA.

Le refroidissement est assuré par circulation d'eau.

Salaün utilise un appareillage moins puissant.

Le tube Philips est alimenté sous une tension maximum de 120 kV.

Le débit varie de 1 à 5 mA.

Caractéristiques du courant photo-voltaïque produit sous l'action des rayons X.

1° *Variations du courant débité par la cellule en fonction des caractéristiques du rayonnement.*

Blet mesure le courant produit par la cellule en fonction du débit dans le tube pour différentes valeurs de la tension. Ces courbes, représentées sur la figure 14, rappellent celles obtenues en lumière blanche sous de forts éclairements entraînant un phénomène de saturation.

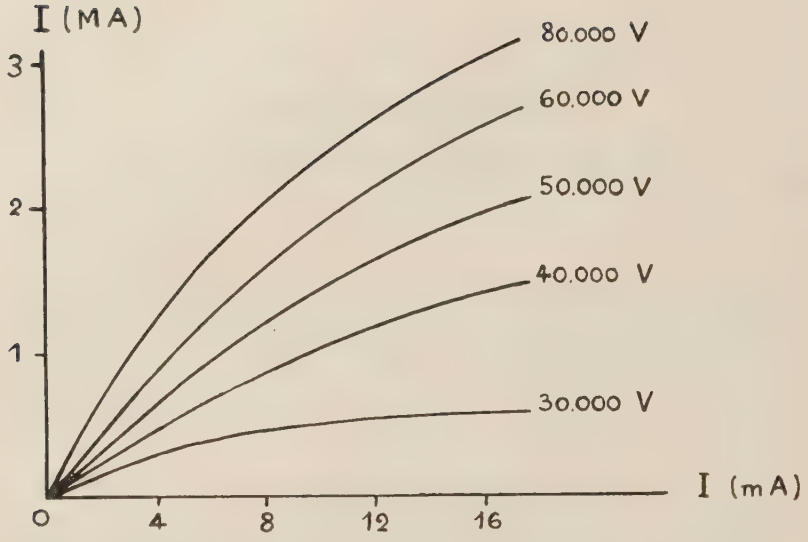

Fig. 14.

Dans une deuxième série d'expériences, Blet étudie les variations du courant produit pour différentes tensions en fonction de l'irradiation de la cellule, laquelle, rappelons-le, est inversement proportionnelle au carré de la distance séparant le tube de la cellule.

Le tableau I donne pour chaque tension du tube un chiffre supérieur correspondant au courant mesuré (en unités arbitraires) pour une distance d et un chiffre inférieur correspondant à la moitié du courant mesuré pour une distance $\frac{d}{\sqrt{2}}$.

Tableau I.

TENSION	INTENSITÉ				
	4 mA	8 mA	12 mA	16 mA	20 mA
40 kV	5	10	14	17	19
	5	10	13,5	15,5	17
60 kV	10	19	23	30	32
	12	23	27	33	39
80 kV	20	35	45	50	60
	25	35	44	55	55

La concordance des chiffres montre que la loi de l'inverse des carrés de la distance est assez bien suivie et que, par conséquent, il y a proportionnalité entre le courant débité et l'exposition.

Dans un travail non publié, Longuet avait trouvé le même résultat.

Il est intéressant de confronter ces résultats avec ceux obtenus par Salaün.

Afin de vérifier la proportionnalité entre l'intensité du courant débité et l'exposition, cet auteur effectue deux séries de mesures.

Dans un premier cas, la cellule est placée à 20 cm d'un tube alimenté sous 100 kV. En notant les différentes valeurs du courant fourni par la cellule en fonction du débit du tube pour différentes valeurs de la résistance externe du circuit, on constate qu'il n'y a proportionnalité que pour une résistance extérieure faible (fig. 15).

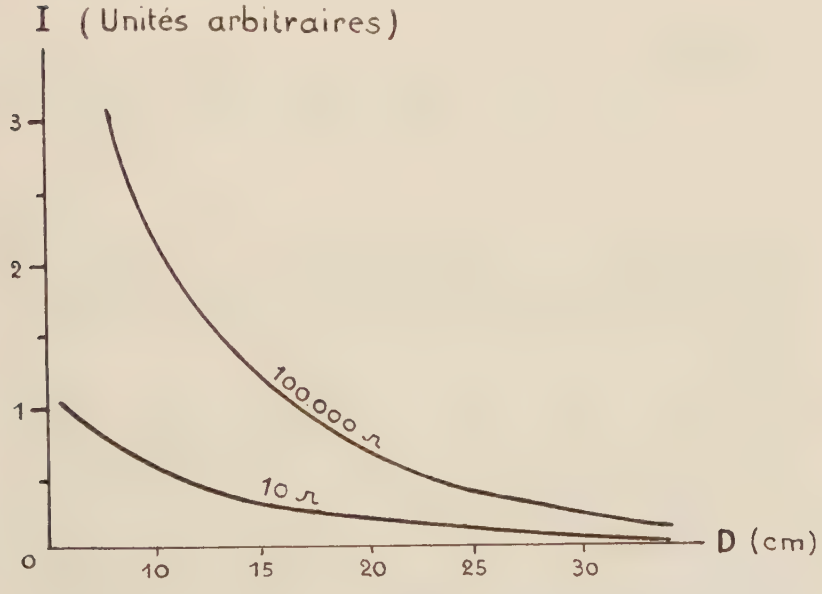

Fig. 15.

Si, au lieu de modifier le débit du tube, on fait varier de 10 à 30 cm la distance séparant la source de rayons X de la cellule, les résultats sont identiques à ceux énoncés précédemment, et, là encore, la proportionnalité n'est obtenue que pour de faibles valeurs de la résistance extérieure (fig. 16).

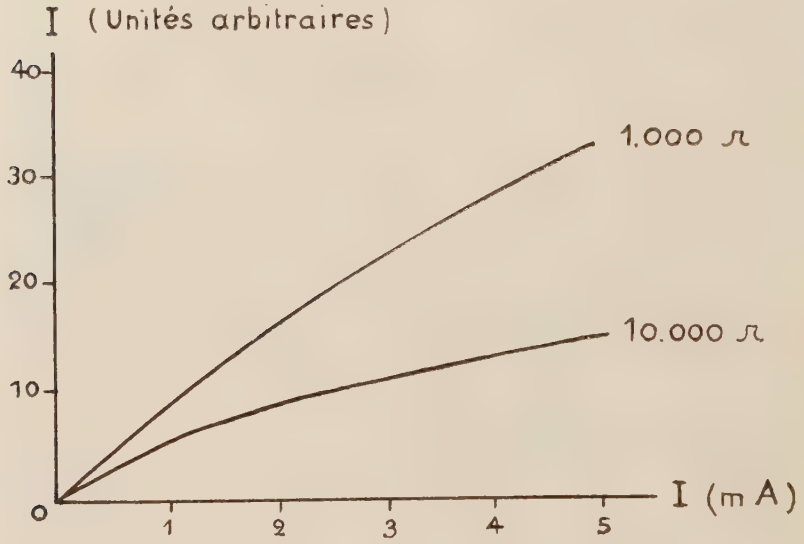

Fig. 16.

Par conséquent, en plaçant la cellule photo-voltaïque près du tube à rayons X, on provoque la saturation de cette cellule et l'on ne peut retrouver une caractéristique linéaire du courant qu'en diminuant la résistance extérieure du circuit.

Dans un deuxième groupe d'expériences, Salaün refait les mêmes mesures, mais en plaçant l'élément photo-voltaïque à 65 cm du tube.

Les chiffres obtenus montrent qu'il y a dans ce cas proportionnalité absolue entre le courant de la cellule et l'intensité du rayonnement, quelle que soit la valeur de la résistance extérieure du circuit.

Les courbes de la figure 17 représentent le courant fourni par la cellule en fonction du débit dans le tube et pour différentes valeurs de la résistance extérieure.

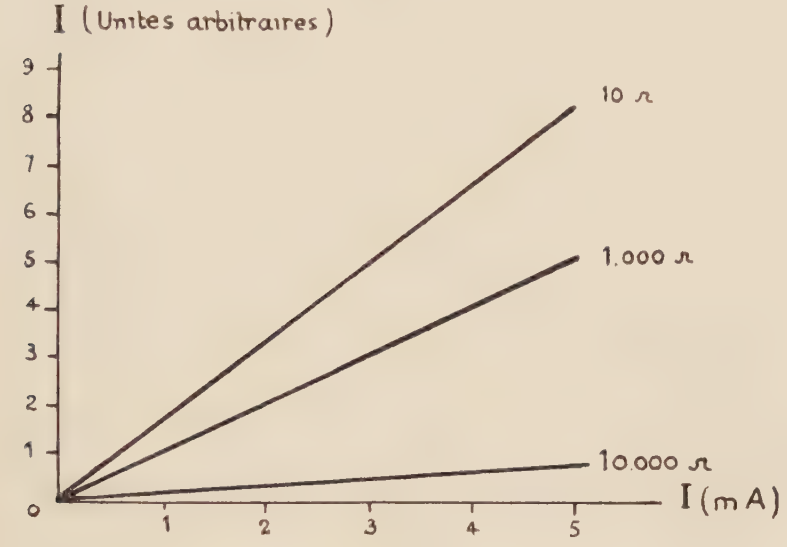

Fig. 17.

La figure 18 donne les variations de la force électromotrice en fonction du débit dans le tube.

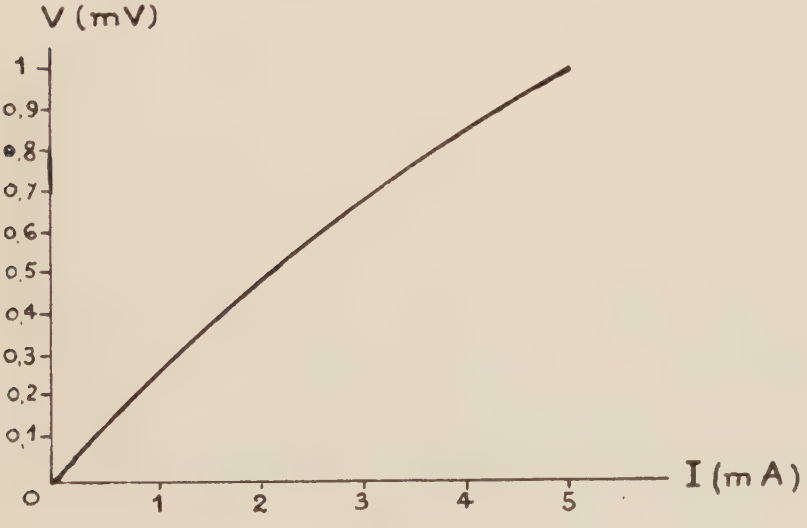

Fig. 18.

Ces résultats paraissent en contradiction avec le phénomène de saturation décrit par Blet et concrétisé par la figure 14.

En réalité, il convient de noter que cet auteur travaille avec des intensités relativement importantes, de l'ordre de 15 à 20 mA, alors que Salaün ne dépasse pas 5 mA.

Par conséquent, dans le premier cas, l'intensité du rayonnement sature la cellule.

Il est d'ailleurs facile de voir que sur la figure 14 le fléchissement des courbes n'apparaît qu'avec des intensités supérieures à 4 à 5 mA. En deçà de ces chiffres, le tracé peut être considéré comme rectiligne.

Nous pouvons donc conclure à l'analogie de ces réponses avec celles obtenues en lumière visible.

Pour des irradiations moyennes, le courant est proportionnel au nombre de photons X tombant sur la cellule. Pour de fortes irradiations apparaît un phénomène de fatigue avec perte de la linéarité.

2° *Variations du courant débité par la cellule en fonction de l'inclinaison du rayonnement incident.*

Salaün complète cette étude en mesurant le courant produit par la cellule pour diverses inclinaisons du faisceau de rayons X.

En lumière visible, l'énergie reçue à la surface de la cellule varie comme le cosinus de l'angle d'incidence. L'effet photo-électrique étant localisé à la surface du semi-conducteur, le courant débité varie lui aussi selon la même loi.

Avec les rayons X, il n'en est pas de même. En effet, les photons X, de par leur grande énergie, traversent le semi-conducteur et créent un effet photo-électrique en profondeur. Par conséquent, en faisant pivoter la cellule, la surface de la couche irradiée varie comme le cosinus de l'angle de rotation, tandis que l'épaisseur de cette couche irradiée lui est inversement proportionnelle.

Le calcul montre que, pour des épaisseurs faibles du semi-conducteur (ce qui est le cas), l'énergie absorbée ne varie pas.

La courbe que nous reproduisons (fig. 19) confirme ces résultats.

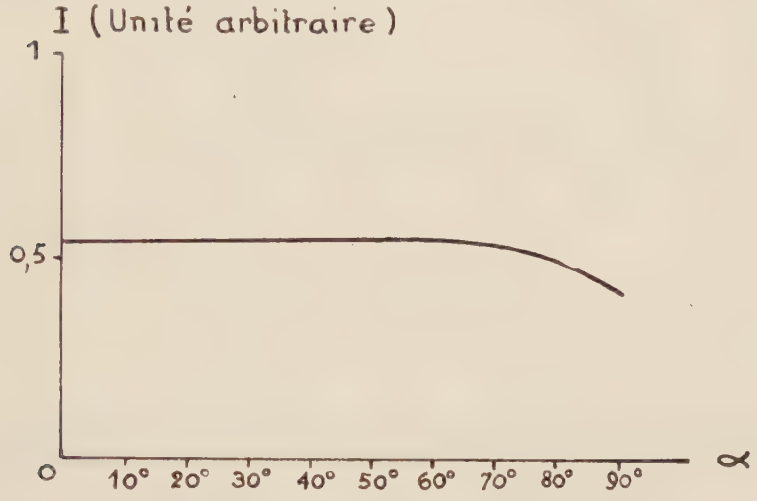

Fig. 19.

3° *Traînage et fatigue de la cellule.*

Utilisant un galvanomètre de courbe période, Blet constate que si l'on irradie brusquement une cellule photo-voltaïque le courant débité n'atteint que progressivement sa valeur maximum, puis subit une décroissance durant plusieurs minutes.

La figure 19 représente les variations du courant fourni par la cellule en fonction du temps pour une tension du tube de 60 kV et un débit de 8 mA.

L'intensité maximum est obtenue au bout de 8 secondes environ. Après une décroissance rapide d'une vingtaine de secondes, le courant diminue lentement pendant plusieurs minutes.

Il existe donc un certain degré d'inertie lors de l'établissement du courant, auquel succède un phénomène de fatigue.

Cette fatigue persiste plusieurs heures, et, durant cette période, son influence se fait sentir sur les irradiations ultérieures en provoquant une diminution du temps nécessaire au courant pour atteindre son maximum.

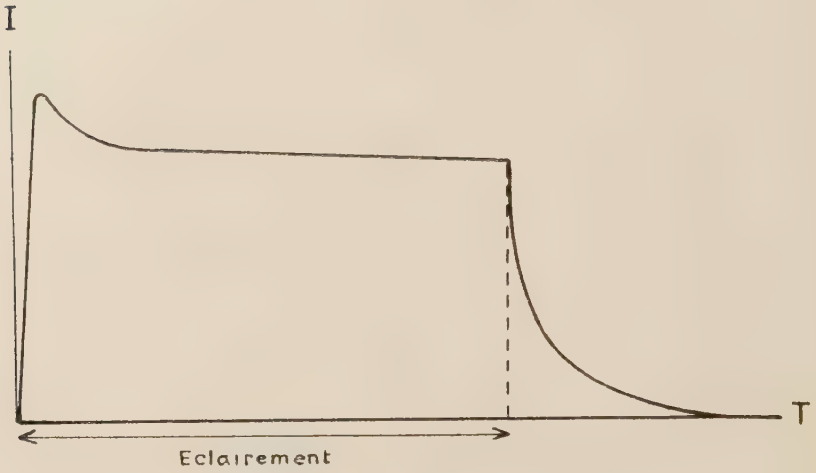

Fig. 20.

Ainsi ce temps, qui était primitivement de 8 secondes, tombe à 4 secondes pour une cellule reposée depuis 2 heures et à 3 secondes pour une cellule reposée depuis 10 minutes.

Ces résultats sont objectivés par une série de mesures effectuées sous des tensions de 20 kV, 40 kV, 60 kV, 80 kV et à nouveau 20 kV. Un intervalle de 5 minutes sépare chaque mesure.

La figure 21 donne les résultats obtenus pour 40, 60, 80 kV. Ces tracés montrent que le temps nécessaire à l'établissement d'un courant maximum est d'autant plus bref que la tension est plus élevée.

La figure 22 compare le courant de la cellule en début et en fin d'expérience pour une même tension de 20 kV.

L'influence de la fatigue se traduit par le raccourcissement signalé plus haut et par une diminution du courant débité par la cellule.

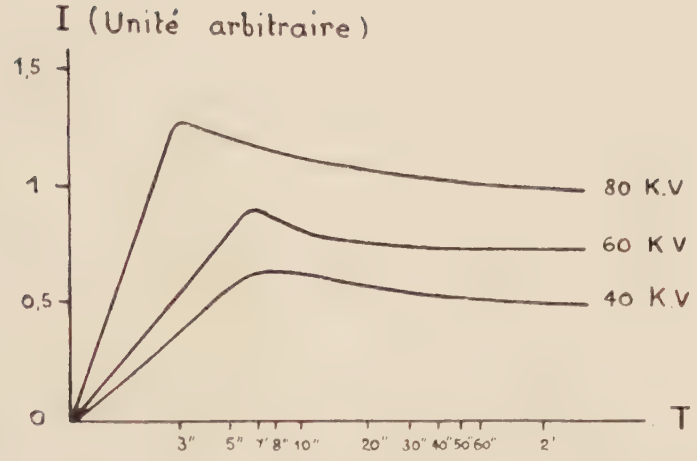

Fig. 21.

Blet détermine la valeur du courant de polarisation dans chaque sens pour des tensions de polarisation s'échelonnant de 0 à 100 mV. Il superpose ensuite le courant obtenu pour une tension du tube de 60 kV et un débit de 4, 8, 12 et 16 mA.

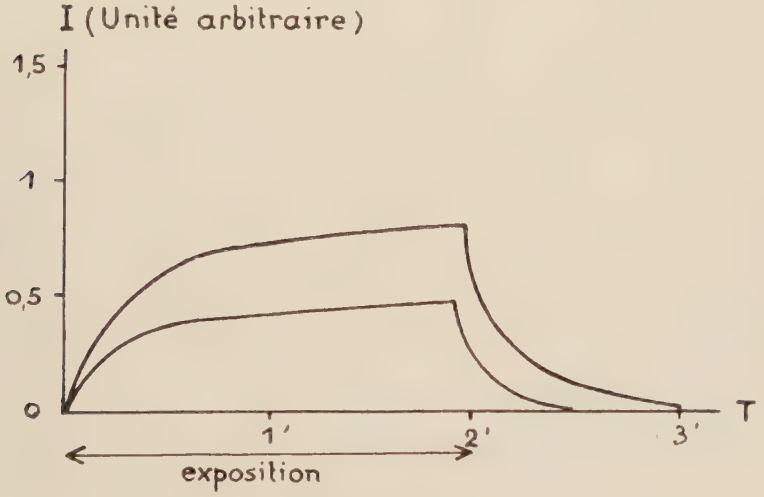

Fig. 22

Les tracés obtenus montrent que :

— dans le cas d'une polarisation positive, le courant total est plus grand que la somme des deux autres, et ceci d'autant plus que la polarisation est plus élevée;

— dans le cas d'une polarisation négative, le courant total est plus petit que la somme des deux autres, et ceci d'autant plus que la polarisation est plus élevée.

Mesure de l'énergie X rayonnée.

Les courants débités par la cellule photo-voltaïque sous l'action des rayons X sont faibles : de l'ordre de 2 à 3 μA.

En lumière blanche, un éclairement d'une puissance de 25 μW suffit à produire un tel courant.

Il est donc intéressant de calculer l'énergie du rayonnement X utilisé.

Blet mesure l'énergie du faisceau de rayons X à l'aide d'un dosimètre Hammer placé à 30 cm du tube.

Il obtient ainsi l'intensité du rayonnement en roentgen par seconde.

Tableau II.

TENSION	INTENSITE			
	4 mA	8 mA	12 mA	16 mA
40 kV	0,24	0,41	0,60	0,76
60 kV	0,44	0,76	1,10	1,40
80 kV	0,58	1,00	1,45	1,84

Appliquant ensuite la formule :

$$E(\text{erg/s/cm}^2) = \frac{I(\text{roentgen}) \times 230}{\lambda^3}$$

il relève pour diverses valeurs de la tension la longueur d'onde correspondante au maximum de l'émission, la transmission de la fenêtre d'aluminium, la valeur du coefficient $\frac{230}{\lambda^3}$ et l'énergie du quantum en joules.

Tableau III.

TENSION	λm (Å)	τ (%)	$\frac{230}{\lambda^3}$	$h\nu$ (joules)
40 kV	0,50	75	1 840	$3,9 \cdot 10^{-15}$
60 kV	0,40	90	3 590	$4,85 \cdot 10^{-15}$
80 kV	0,35	100	5 350	$5,55 \cdot 10^{-15}$

Connaissant la surface utile de la cellule, il est possible de calculer l'énergie reçue en milliwatts.

Tableau IV.

TENSION	INTENSITE			
	4 mA	8 mA	12 mA	16 mA
40 kV	1,2	2	3	3,8
60 kV	4,3	7,4	10,8	13,7
80 kV	8,5	14,6	21,1	26,8

Dans sa conversion des roentgen en erg/cm², la formule utilisée par Blet est assez peu justifiée, car il multiplie le nombre de roentgens par $\frac{230}{\lambda^3}$ pour tenir compte de la variation de la valeur du roentgen en fonction de la longueur d'onde.

En fait, cette formule postule que toute l'absorption du

rayonnement dans l'air est due à l'effet photo-électrique (intervention de λ^3), ce qui est inexact aux tensions utilisées par Blet, puisque l'effet photo-électrique n'est prépondérant que pour une dizaine de kilovolts.

Il faut remplacer la formule d'équivalence de Blet par celle de Mayneord :

$$Ef = \frac{83{,}8\ \rho}{\tau + \sigma a}\ \text{ergs/cm}^2\text{/roentgen},$$

— Ef désignant l'énergie;
— ρ la masse spécifique de l'air;
— τ le coefficient d'absorption photo-électrique;
— σa le coefficient d'absorption par effet Compton donné par exemple par la formule de Klein et Nishina.

Les tables de conversion de Hine et Brownell montrent que le flux d'énergie en erg/cm² et par roentgen est de :

19,9	pour	10 000 *e*V
70,9	—	15 000 *e*V
175	—	20 000 *e*V
602	—	30 000 *e*V
1 360	—	40 000 *e*V
2 230	—	50 000 *e*V
2 920	—	60 000 *e*V
3 550	—	80 000 *e*V

Alors qu'en utilisant la formule de Blet on obtient :

120	pour	10 000 *e*V
405	—	15 000 *e*V
960	—	20 000 *e*V
3 240	—	30 000 *e*V
7 680	—	40 000 *e*V
15 000	—	50 000 *e*V
25 920	—	60 000 *e*V
61 440	—	80 000 *e*V

Il ne s'agit malgré tout que d'un point de détail. L'important n'est pas de connaître la réponse de la cellule à

l'énergie transportée par le faisceau de rayons X, mais de savoir si cette cellule fournit un moyen pratique de mesurer les roentgens ou, en d'autres termes, de savoir si elle est sensible aux modifications qui font varier la quantité de roentgens débités par le tube.

Nous savons que cette quantité est proportionnelle à l'intensité qui traverse le tube et à une puissance du voltage qui dépend du type d'appareil utilisé et est susceptible de varier de 2 à 5.

Salaün s'est livré à des travaux analogues à ceux de Blet en mesurant le rapport de l'intensité du rayonnement mesuré à la cellule avec l'intensité mesurée à la grande chambre d'ionisation pour diverses valeurs de la longueur d'onde.

Il calcule, par conséquent, l'équivalent milliampères-roentgens pour différentes longueurs d'onde ou encore la sensibilité de la cellule.

Cette étude a été facilement réalisée, pour les grandes longueurs d'onde, à l'aide d'un tube démontable dont on pouvait changer la nature de l'anticathode, et qui permettait l'obtention d'un rayonnement monochromatique, comme l'ont montré Dognon et Piffault.

Cet étalonnage a du reste été effectué sous la direction de ces deux auteurs.

Mais, ici encore, Salaün égale le coefficient de diffusion et le coefficient d'absorption par effet photo-électrique, ce qui n'est pas très légitime pour les tensions de 150 à 200 kV utilisées.

Cependant, l'allure qualitative de ces résultats persiste et est objectivée par la figure 23, qui, pour les courtes longueurs d'onde, montre une discontinuité brutale correspondant à la discontinuité d'absorption du sélénium.

Le résultat pour 150 à 200 kV n'offre pas grand intérêt du fait de l'impossibilité de définir une longueur d'onde du rayonnement.

Plutôt que d'utiliser des filtres et des couches de demi-

absorption de cuivre, il serait préférable d'utiliser des couches de demi-absorption de sélénium.

Nous devons enfin signaler que Salaün a essayé d'impressionner la cellule à l'aide de radium, mais le courant est nul dans ce cas.

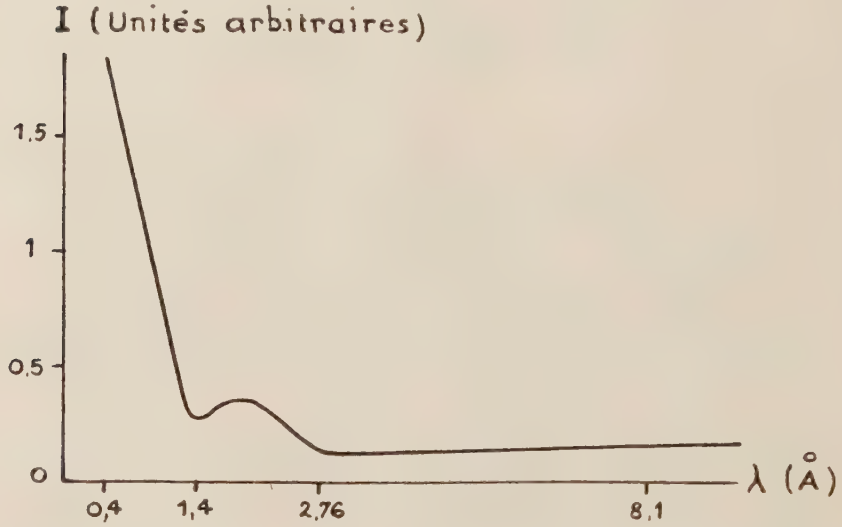

Fig. 23.

Calcul du rendement.

Du fait de l'incertitude existant sur la conversion du roentgen en ergs ou en watts, il nous paraît vain de chercher, comme l'a fait Blet, une équivalence précise.

Cependant, les résultats obtenus sont qualitativement valables et montrent que le rendement en milliampères par watt reste constant quelle que soit l'intensité dans le tube. En outre, le courant débité est pratiquement proportionnel à l'énergie reçue.

On constate que le rendement diminue lorsque la tension du tube augmente, ceci étant dû à la diminution du pourcentage de photons absorbés. Cet inconvénient est identique à celui auquel on se heurte lors de mesures par ionisation ou par photométrie.

Ainsi, si nous désignons par I_0 l'intensité du rayonnement qui frappe la pellicule de sélénium, par I l'intensité du rayonnement sortant, par μ le coefficient massique d'atténuation et par x l'épaisseur de la pellicule de sélénium, qui est très faible, nous avons :

$$I = I_0 e^{-\mu x}.$$

et la fraction absorbée, du fait de la petitesse de x, est :

$$\frac{I_0 - I}{I_0} = \mu x.$$

Blet a constaté que, pour différentes tensions, le rendement quantique par watt divisé par le coefficient massique d'atténuation du sélénium était pratiquement constant.

Il n'y a pas d'intérêt à reproduire ici les chiffres, du fait des considérations qui précèdent. Le fait important réside dans le sens de la variation.

A partir des nombres trouvés, connaissant l'épaisseur de la pellicule de sélénium, il est possible de calculer le rendement quantique vrai, c'est-à-dire le nombre de photoélectrons débités par photon *absorbé*.

Les constructeurs ne donnant pas de renseignements sur l'épaisseur de la couche de sélénium, Blet a dû employer une méthode titrimétrique qu'il avoue lui-même fort imprécise.

Par conséquent, nous ne retiendrons que l'ordre de grandeur du résultat, qui est de 1 000 à 2 000.

Il est important de noter l'analogie de ces chiffres avec ceux obtenus en dosimétrie photographique.

Une telle concordance n'est d'ailleurs pas étonnante, le sélénium ayant une masse atomique de 79 et l'argent une masse atomique de 108.

Ce fait souligne l'analogie que l'on peut espérer d'une opération de dosimétrie par cellule photo-voltaïque et par film photographique.

CONCLUSIONS

Cette étude comparative des travaux effectués avant nous nous conduit à formuler les conclusions suivantes :

I. — Les cellules photo-voltaïques, bien que peu sensibles à l'action des ultra-violets, qui ne pénètrent pas de façon suffisante dans la couche d'arrêt, sont sensibles à l'action des rayons X.

II. — Les courants décelés pour des expositions de l'ordre de grandeur de celles utilisées en thérapeutique le sont facilement par des galvanomètres de type courant.

III. — Il existe aux faibles expositions une réponse linéaire du courant débité dans le circuit de mesure en fonction de l'exposition.

IV. — Les phénomènes de fatigue aux rayons X, certains pour Blet, sont douteux pour Salaün et pour Longuet. Ce point mérite d'être éclairci, mais il est assez vraisemblable que, s'il y a fatigue, elle ne sera pas gênante en dosimétrie.

V. — Les divers régimes transitoires : inertie, traînage et fatigue, sont de trop courte durée pour être vraiment gênants en dosimétrie X.

VI. — La linéarité de la réponse aux faibles expositions, l'ordre de grandeur du rendement quantique, l'analogie de la théorie, font de la cellule photo-voltaïque un instrument assez analogue en dosimétrie à la plaque photographique.

VII. — La réponse est indépendante de l'angle d'incidence du rayonnement comme dans le cas des émulsions photographiques.

VIII. — Par contre, la cellule photo-voltaïque est d'un emploi beaucoup plus facile, puisqu'elle ne nécessite pas de manipulations chimiques et qu'elle permet une lecture instantanée sans source de tension auxiliaire.

IX. — La cellule photo-voltaïque peut rendre par conséquent des services du même ordre que la plaque photographique en dosimétrie de surveillance.

Il y a donc intérêt à étudier son adaptation à un type de mesure où une haute précision n'est pas indispensable, étant donné que l'on sait maintenant construire des galvanomètres sensibles et portatifs.

Les circonstances nous ayant empêché de nous livrer à cette étude, nous comptons l'entreprendre ultérieurement

SERMENT

En présence des Maîtres de cette Ecole, de mes condisciples, je promets et je jure d'être fidèle aux lois de l'honneur et de la probité dans l'exercice de la Médecine.

Je donnerai mes soins à l'indigent et n'exigerai jamais un salaire au-dessus de mon travail. Admis dans l'intérieur des maisons, mes yeux ne verront pas ce qui s'y passe; ma langue taira les secrets qui me seront confiés, et mon état ne servira pas à corrompre les mœurs ni à favoriser le crime.

Reconnaissant envers mes Maîtres, je tiendrai leurs enfants et ceux de mes confrères pour des frères, et s'ils devaient apprendre la médecine ou recourir à mes soins, je les instruirais et les soignerais sans salaire ni engagement.

Si je remplis ce serment sans l'enfreindre, qu'il me soit donné de jouir heureusement de la vie et de ma profession, honoré à jamais parmi les hommes, si je le viole et que je me parjure, puissé-je avoir un sort contraire.

Vu, bon a imprimer :
Le Président,

Vu : *Le Doyen*,
R. SIGALAS.

Vu et permis d'imprimer :
Bordeaux, le 19 juin 1957.
Le Recteur de l'Académie,
E. DELAGE.

BIBLIOGRAPHIE

La couche sensible d'une cellule photo-électrique étant constituée d'un corps semi-conducteur, ces cellules présentent une grande analogie de fonctionnement avec les transistors utilisés en électronique.

Les auteurs tchèques ont d'ailleurs mis en évidence la production d'un courant photo-voltaïque par les cristaux de germanium sous l'action des rayons X.

Ces faits nous ont incité à inclure dans la bibliographie quelques articles récents sur la théorie des transistors.

Adler (E.). — Absolute reaction rates and the photovoltaïc effect *The Journal of Chemical Physics*, 1940, 8, p. 500-501.

Backovsky (J.), Malkovská (M.), Taúc (J.). — Photovoltaic effect caused by X rays at P — N junctions in germanium *Czeckoslovak Journal of Physics*, 4, 1954, p. 98.

Blet (G.). — Recherches théoriques et pratiques sur les cellules photo-électriques à couche d'arrêt.

— Réponse des cellules en lumière blanche et colorée, effet Purkinje direct et inverse. *M. C. I.*, *mai* 1953, 193, p. 239-244.

— Quelques essais d'interprétation des lois régissant le comportement des photopiles. *M. C. I.*, oct. 1953, 197, p. 535-544.

— Quelques conséquences pratiques de la théorie du potentiel retardateur. *M. C. I.*, *janv.* 1954, 200, p. 11-15.

— L'effet photo-électrique des rayons X sur les cellules. *M. C. I.*, avr. 1954, 203, p. 233-237.

- Courbes de sensibilité spectrale des cellules au germanium *M. C. I., juill.* 1954, 206, p. 435-438.

— Sensibilité des photopiles aux faibles quantités de lumière *M. C. I.*, mai 1955, 206, p. 341-344.

Influence de l'état de la polarisation de la lumière sur la sensibilité des cellules. *M. C. I.*, juill. 1955, 218, p. 501-504.

Réponse des cellules aux flux lumineux modulés. *M. C. I.*, août 1955, 219, p. 537-544.

- Courbes de réponse des cellules aux flux lumineux modulés. *M. C. I.*, févr. 1956, 225.

— La capacité interne des photopiles. *M. C. I.*, juill. 1956, 230, p. 501-507.

— Etude balistique des photopiles. *M. C. I.*, mai 1957, 240 p. 335-436.

— L'effet photo-électrique des photopiles au sélénium aux basses températures. *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences*, 1955, **240,** 9, p. 962-963.

— Photo-électricité. De l'influence du proche infra-rouge aux basses températures sur les propriétés des photopiles au sélénium. *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences*, 1956, **243,** II, p. 798-800.

Cassel (H. M.). — Note on the chain photolysis of acetal. The photovoltaïc effect. *The Journal of Chemical Physics*, 1941, 9, p. 377.

Corney (G. M.) et Cleare (H. M.). — Disaster monitoring with amateurs and commercial photographics films. *Nucleonics.* 1955, **13,** 8, p. 40-41.

Delorme (G.). — Données physiques de la radiographie. Thèse Bordeaux, mai 1952, n° 77.

Destriau (P.). — Electro-luminescence et perspectives d'avenir en radiologie. Thèse Bordeaux, févr. 1957, n° 9.

Dosimètre de précision pour le contrôle des rayonnements ultra-violets des lampes germicides. *M. C. I.*, févr. 1956, n° 225

Fahnestock (J. D.). — Transistor manufacture. *Electronics* (U. S. A.), oct. 1953, **26,** 10, p. 131-134.

Ferencz (E.) et Urbanick (J.). — Sensibilité et variation de sensibilité des cellules à couche d'arrêt. *Revue d'Optique*, 1935, 14, p. 316-327.

Friedman (H.) et Glover (C. P.). — Radiosensitivity of alkali halide crystals. *Nucleonics*, 1955, 10, p. 24-35.

Fronhmeyer (G.), Glocker (R.) et Messner (J. D.). — Die Wellenlägenabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit von Kadmium Sulphid. *Zeitschrift für Physik*, 1954, p. 117-125.

Geel (W. V. von). — Cellules photo-électriques à couche d'arrêt *Revue technique Philips*, mars 1946, **8,** 3, p. 65-71.

Gorenbein (E. Ia). — Teoria anomalnoï molekouliarnoï elektropro vodnosti v sviazi skomplekso obrazovannem. *Oukraiskii Khimitchiskii Journal*, 1950, **16,** p. 107-114.

Haven (Y.), Santen (J. H. von). — On pre-exponential factors in formulae for ionic conductivity in solids. *Philips Research Reports*, déc. 1952, 7, p. 474-477.

Hillson (P. J.), Rideal (E. K.). — On overpotential and the photovoltaïc process at polarized electrodes. *Proceding of the Royal Society*, 1949, 199-203.

Jonker (J. L. H.). — The similarity law of secondary emission. *Philips Research Reports*, oct. 1954, 9, p. 391-400.

Kahn (D.). — Radiation dosimetry using alkali halide crystals and the absorption of betatron bremstrahlung in water and bone. *Acta Radiologica*, sept. 1956, vol. 46, fasc. 3.

Kikoin (I. K.). — Novy fotomagnity effekt v polouprovodnikakh neodnorodnom pole. *Doklady Akademii Naouk*, S. S. S. R., 1954, **96,** p. 463-464.

Kurylenko (C.). — Zones de Brilloin, conductibilité électrique des métaux et spectres d'absorption K, des rayons X. *Cahiers de Physique*, févr. 1955, 54; mars-avr. 1955, 56; mai-juin 1955, 57-58; juill. 1955, 59; août 1955, 60; sept. 1955, 61; déc. 1955, 64; févr. 1956, 66; juin 1956, 70.

Lawrance (R.). — The photovoltaïc effect in natural lead sulphid.

Australian Journal of Scientifics Research, 1951, 4, p. 570-578.

Lehmann (G. L.), Meulean (C.). — Regulateur de température pour métallurgie du germanium. *L'onde electrique*, déc. 1953, **33**, 321, p. 678-683.

Levin (I.) et Wite (C.). — Studies on the photovoltaïc effect. *The Journal of Chemical Physics*, 1951, **11**, 9, p. 1079-1084; 1953, **21**, 10, p. 1654-1659.

Lichtenstein (R. M.). — Radiation dosimetry with crystal conduction dosimeter. Brookhaven Conference, february 1952.

Lingel (F. J.). — Germanium power rectifier construction. *Electronics* (U. S. A.), juin 1952, **25**, 6, p. 210-212.

Lovelock (R. T.), Jupe (J. H.). — Germanium diodes. *Wireless World* (G. B.), févr. 1951, **57**, 2, p. 57-60.

Marchal (G.) et Marton (L.). — Quelques observations sur les cellules photo-électriques à couche d'arrêt au sélénium. *Revue d'optique théorique et instrumentale*, 1936, 15, p. 1-11.

Meier (H.). — Ueber den inneren lichtelektrischen Effekt an organischen Farbstoffen bei quer und Langsfeldbelichtung *Zeitschrift für Elektrochemie*, 1954, **58**, 10, p. 859-867.

Mercier (J.-M.). — La technologie du germanium. *L'onde électrique*, juill. 1954, **34**, 328, p. 559-572.

Mott (N. F.). — Electronic processes in ionic crystals. Oxford University Press, New-York, 1948.

Nadjakov (G.), Andreitchine (R.). — Vrkhou sgchtchnosteta i proizkhoda na ftovoltaithnitb efekti pri izolatori i polouprovodnitsi. *Annuaire de l'Université de Sofia*, 1941, p. 197-316.

Noddack (W.), Eckert (G.), Meier (H.). — Ueber den Mechanismus der photographischen Sensibilisierung. *Zeitschrift für Elektrochemie*, 1952, **56**, 8, p. 735-740.

Noddack (W.), Meier (H.). — Ueber den Sperrschichtphotoeffekt an Sensibilisatorfarbstoffen. *Zeitschrift für Elektrochemie*, 1953, **57**, 8, p. 691-696.

Nouvelle (La) cellule photo transistor. *M. C. I.*, mai 1951, 168 p. 199. Extrait de *Bell Lab. Record*, août 1950.

Pospekhov (D. A.). — O sviazi mejdou viazkostviou vi elektroprovodnostiou v nekotopykh binarnykh rasplavakh soleï. *Journal obchtcheï khimii*, **20**, 2, 1950.

Poutseiko (E. K.) et Terenin (A. N.). — Sensibilizatsia vnourennego foto-effecta polouprovodnikov klorofiloï i rodstvennymi pigmentani. *Doklady Akademii Naouk*, S. S. S. R., 1953, **90**, 6, p. 1005-1008.

Reboul (J.). — Quelques notions nouvelles en dosimétrie. *Journal de Radiologie*, 1947, p. 165-166.

— Etude physique de la dosimétrie pratique. *Journal de Radiologie*, 1947, p. 130-134.

Reboul (J.), Duhamel (J.). — Remarques sur l'utilisation des mesures effectuées en roentgen internationaux. *Journal de Physique*, avr. 1951, p. 255-275.

— Remarques sur la définition du roentgen et sur l'utilisation des mesures effectuées en roentgen internationaux. *Journal de Radiologie et d'Electrologie*, 1956, **37**, 1-2, p. 41-47.

Reboul (J.), Delorme (G.), Lochet (J.), Bouyssou (F.). — Remarques sur l'action photographique des rayons X. *Journal de Radiologie*, 1950, p. 802-803.

Reboul (J.), Delorme (G.), Masseys (Ch.). — Remarques sur l'action photographique des rayons X. *Journal de Physique*, juin 1950, **2**, p. 43-44.

Roddom (T.). — Transistors. *Wireless World*, part 7, août 1953, **59**, 8, p. 359-360; — part 8, sept. 1953, **59**, 9, p. 435-438.

Salaün (O.). — Les cellules photo-voltaïques et leur application à la mesure des rayons X. Thèse Paris, 1933.

Schultz (B. H.). — Analysis of the decay of photo-conductance in germanium. *Philips Research Laboratories*, 1955, **10**, p. 333-348.

Seitz (F.). — The Physics of metals. M. C. Graw Hill, New-York and London, 1943.

Shea (R. F.). — Principles of transistors circuits. John Wiley and Sons, New-York, 1953.

Shockley (W.). — Electrons and holes in semi conductors. Van Nostrand Cy, New-York, 1950.

Siade (B. N.). — Survey of transistor developpment. *Radio Telev. News* (U. S. A.), sept. 1952, **48**, 3, p. 43-45; 170-171; — oct. 1952, **48**, p. 64-65, 112, 114-115.

Stieltjes (F. H.) et Tummers (L. J.). — Théorie sommaire du transistor à jonction. *Revue technique Philips*, janv.-févr 1956, **17**, p. 217.

Suchet (J.). — Les transistors. — Conductibilité électronique du germanium. *M. C. I.*, juill. 1954, 206, p. 451-453.

— Technique de fabrication. *M. C. I.*, août 1954, 207, p. 511-516.

— Fonctionnement et caractéristiques. *M. C. I.*, sept. 1954 208, p. 571-574.

— Le circuit du transistor. *M. C. I.*, déc. 1954. 211, p. 821-825, *M. C. I.*, avr. 1955, 215, p. 303-307.

Terrien (J.). — La cellule photo-électrique. Presses universitaires de France, Vendôme, 1951.

Thienchi (N. T.), Suchet (J.). — Conductibilité des semi-conducteurs électroniques et thermistances. *L'onde électrique*, déc. 1951, 297.

Vesselovskii (V. I.). — Sensibilizatsionnyi mekhanizm fotoelektrokhimitcheskogo protsessa Na, Zn, ZnO, Elektrode. *Journal fizitcheskoï Khimii*, 1948, **22**, p. 1427-1442.

— Fotogalvanitcheskie protsessy Na zolotoï elektrode. *Journal fizitcheskoï Khimii*, 1946, **20**, p. 269-296.

Vessem (J. C. van). — Fonctionnement et construction des diodes au germanium. *Revue technique Philips*, févr. 1955, **16**, p. 245.

Wlerick (G.). — Rôle des trappes profondes dans la formation du signal photo-électrique des couches minces de sulfure de cadmium. *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, 1954, 239, p. 257-259.

— Interprétation de la variation anormale de la photo-conductibilité du sulfure de cadmium en fonction de l'éclairement. *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, 1954, 238, p. 2514-2516.

Wlerick (G.), Prégermain (F.). — Etude des propriétés physiques des couches minces photo-sensibles de sulfure de cadmium. *Le Journal de Physique et le Radium*, nov. 1954, **15**, p. 757-764.

Wyatt. — Improving the linearity of barrier-layer photocells *Journal of the Scientifics Instruments*, 1957, **34**, 3, p. 106-108.

Zaidman (N. M.). — Spektralnoe raspredelenie fotovoltaitcheskogo effekta na bromieto-sepebranykh elektrodakh. *Doklady Akademii Naouk*, S. S. S. R., 1953, **48**, 4, p. 693-696.

ERRATA

Figure 9, *au lieu de :* I (MA), *lire :* I (μA).
Figure 14, *au lieu de :* I (MA), *lire :* I (μA).
Intervertir les figures 15 et 16.

BIBLIOGRAPHIE

Les cellules photo-voltaïques et leurs possibilités dans le domaine des rayons X.

Dognon (A.), Piffault (C.), Salaun (O.). — *Bulletin officiel de la Société d'électrothérapie et de radiologie*, nov. 1933, **42**, p. 496 à 500.

24903. — Imprimeries Delmas, Bordeaux.

Dépôt légal effectué en 1957 (2e trimestre).